

S-310JA-1, 2 号機に搭載された同軸円筒型 エネルギー分析器による入射粒子の観測

久保治也*・伊藤富造*

Observations of Precipitating Electrons by Cylindrical Electrostatic Analyzers on Board the Japanese Antarctic Sounding Rockets S-310JA-1 and 2

Haruya KUBO* and Tomizo ITOH*

Abstract: Cylindrical electrostatic analyzers on board the Japanese Antarctic sounding rockets S-310JA-1 and S-310JA-2 launched on February 13, 1976 and on February 10, 1977, respectively, at Syowa Station, measured the energy spectra of energetic electrons in the Antarctic polar ionosphere. At the time of the former flight, the geomagnetic activity was low, and the electron flux of about 10^3 electrons/cm²·sec·str·eV was obtained at an energy of 5 keV. The altitude dependence of the flux of 2 keV electrons showed the maximum flux near 150 km altitude of the descending path. This implies that there was a local electron precipitation region. At the time of the latter flight, the geomagnetic activity was high and there was a diffuse aurora at the time of launch. The measured electron flux was about 1.8×10^3 electrons/cm²·sec·str·eV at the energy of 4.2 keV and about 2.3×10^4 electrons/cm²·sec·str·eV at 740 eV. The electron whose energy was in the neighborhood of 500 eV had a considerable pitch angle dependence, and the field aligned current density due to these electrons was estimated to be about 1.47×10^{-7} A/m².

要旨: 1976年2月13日と1977年2月10日に昭和基地から打ち上げられた、S-310JA-1号機とS-310JA-2号機に、各々同軸円筒型エネルギー分析器を搭載して、南極電離層中の電子のエネルギースペクトルを測定した。最初の飛しょう時には地磁気活動度が低く、5 keV のエネルギーで約 10^3 electrons/cm²·sec·str·eV の電子フラックスが観測された。また、2 keV 電子のフラックスは下りの150 km 近傍で最大で、局所的な電子の降下領域があることを示唆した。後の飛しょう時には地磁気活動度が高く、diffuse aurora が発生していた。4.2 keV のエネルギーで約 1.8×10^3 electrons/cm²·sec·str·eV の電子フラックスが、また740 eV のエネルギーでは、約 2.3×10^4 electrons/cm²·sec·str·eV の電子フラックスが観測された。500 eV 近傍のエネルギーの電子は、ピッチ角依存性が大きく、約 1.47×10^{-7} A/m² の電流密度の電子流が、この500 eV 近傍の電子によって、磁力線に沿って流れていたと考えられる。

* 東京大学宇宙航空研究所. Institute of Space and Aeronautical Science, University of Tokyo, 6-1, Komaba 4-chome, Meguro-ku, Tokyo 153.

1. 緒 言

近年、オーロラ電子のロケットを用いての観測が多々なされているが、オーロラは時間的にも空間的にも変化するので、実験結果は、オーロラの状態や地磁気の状態によって種々異なっている。したがって種々の条件の下で、オーロラ電子のデータを蓄積することは、オーロラ解明の上からも非常に重要である。また、オーロラの存在しない時の極域電離層中での粒子計測は、今まではほとんど試みられていないが、静穏時のデータもオーロラ解明の上から必要である。ここでは S-310JA-1 号機および S-310JA-2 号機による極域電子の観測結果について述べる。1号機での実験目的は、昼間の極域電離層における降下電子に関する情報を得ることで、2号機での実験目的はオーロラサブストーム中の電子のエネルギースペクトルを得ることである。これ等に関しては、すでに KUBO *et al.* (1978), 久保他 (1979) に詳細が報告してあるので、ここでは簡単に述べる。

2. 観測器および打ち上げ状況

S-310JA-2 号機の観測器のブロック図を図1に示す。1号機の場合もほとんど同じである。観測器はセンサー部とエレクトロニクス部よりなり、センサー部は円筒型コリメーター、中心半径 60 mm, 電極間隔 3 mm, 中心角 60° の同軸円筒型エネルギー分析器およびチャンネ

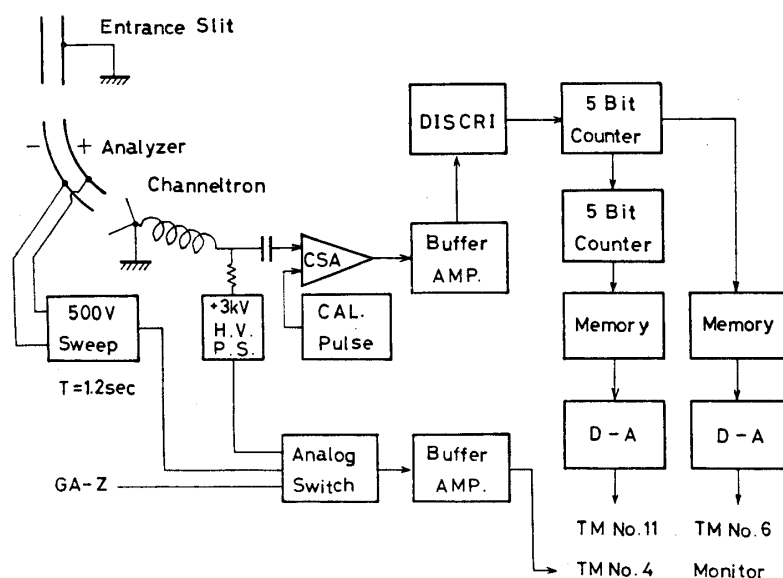


図1 S-310JA-2 号機に搭載した電子フラックス測定器のブロック図

Fig. 1. Block diagram of the detector system of the electron flux on board S-310JA-2.

ルトロン (Galileo 4028) より成る。コリメーターはロケット軸と平行になっている。エネルギー分析器の内側電極に $+V$ ヴォルト, 外側電極に $-V$ ヴォルトの電位を同時に与える。その時エネルギー分析器を通過する電子の中心エネルギー $E(\text{eV})$ は, V と $E=20V$ なる関係式で与えられる。これ等のセンサーは打ち上げ前に, スペースチェンバー内で calibration を行い, 中心エネルギーは $\pm 2\%$ の精度で計算値と一致していた。また, 以後の解析で, チャンネルルトロンの計数効率 ϵ は 1 と仮定している。

1) 1号機の場合

Geometrical factor : $1.54 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$

視野角 : $4.2^\circ \times 4.2^\circ$

エネルギー分解能 : $\Delta E/E = \frac{1}{20}$

エネルギー掃引 : 100 eV–10 keV の間を 0.5 Hz の三角波で掃引

データ取得の time base : 10 msec

打ち上げ時刻 : 1245 LT (太陽天頂角 55°)

打ち上げ方向 : 方位角 315° , 発射角 80°

地磁気 : quiet

2) 2号機の場合

Geometrical factor : $5.3 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ str}$

視野角 : $5.6^\circ \times 5.6^\circ$

エネルギー分解能 : $\Delta E/E = \frac{1}{20}$

エネルギー掃引 : 階段波 (10, 6.4, 4.2, 2.7, 1.76, 1.14, 0.74, 0.48, 0.31, 0.2 keV) で掃引し, 一掃引中1つのエネルギーの観測時間は 100 msec である。Background を正しく評価するために, 分析器の電極に電子が通過できないように逆極性の電圧を 100 msec 印加し, またここから 10 keV まで急激に電圧が立ち上がれないので, その間の 100 msec のデータは捨てる。したがって全体としての掃引周期は 1.2 sec となる。

データ取得の time base : 100 msec

打ち上げ時刻 : 0323 LT (太陽天頂角 89.97°)

地磁気 : polar magnetic substorm の expansion phase

3. 実験結果

3.1. S-310JA-1 号機

図2にS-310JA-1号機の軌道を示す。データから推測される電子の局所的降下領域も示してある。測定された電子のスペクトルを図3に示す。最高到達高度近傍の電子フラックスは

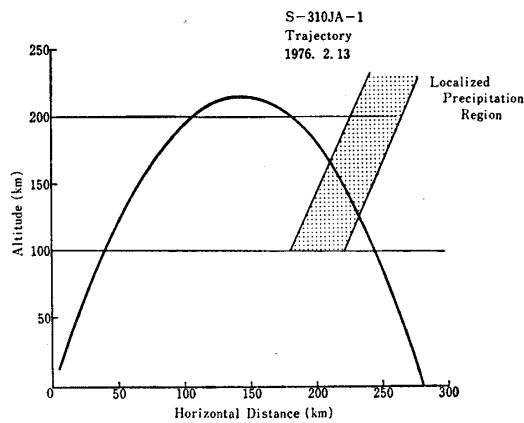


図2 S-310JA-1号機の軌道
Fig. 2. Trajectory of S-310JA-1.

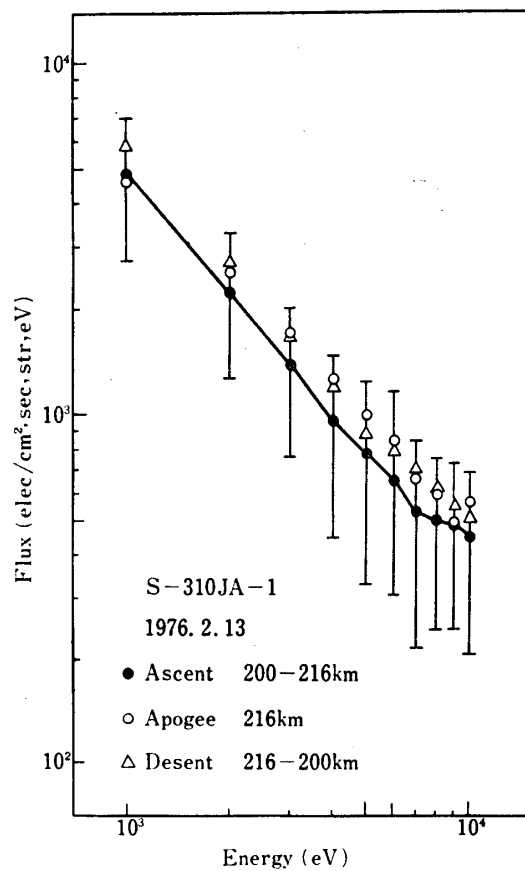


図3 測定された電子のエネルギースペクトル
Fig. 3. Energy spectra of measured electrons.

1 keV で約 $3-7 \times 10^3$ electrons/cm²·sec·str·eV であった。フラックスの分布関数はべき分布で近似され、7 keV までは $f(E) \propto E^{-1.1}$ で、7 keV 以上ではスペクトルが硬くなる。図4は下降時のエネルギースペクトルである。図4のフラックスの方が図3のフラックスよりも大きい。これはロケットが下降時に電子の局所的降下領域に突入したことを示唆している。図4のスペクトルも高エネルギー側で硬化している。

電子フラックスの2つのエネルギーでの高度変化を図5に示す。この高度変化は HILL *et al.* (1970) および KUBO *et al.* (1976) の高度変化とは逆で、高高度で低フラックスを示している。これも電子の局所的降下領域が存在したことを示唆している。

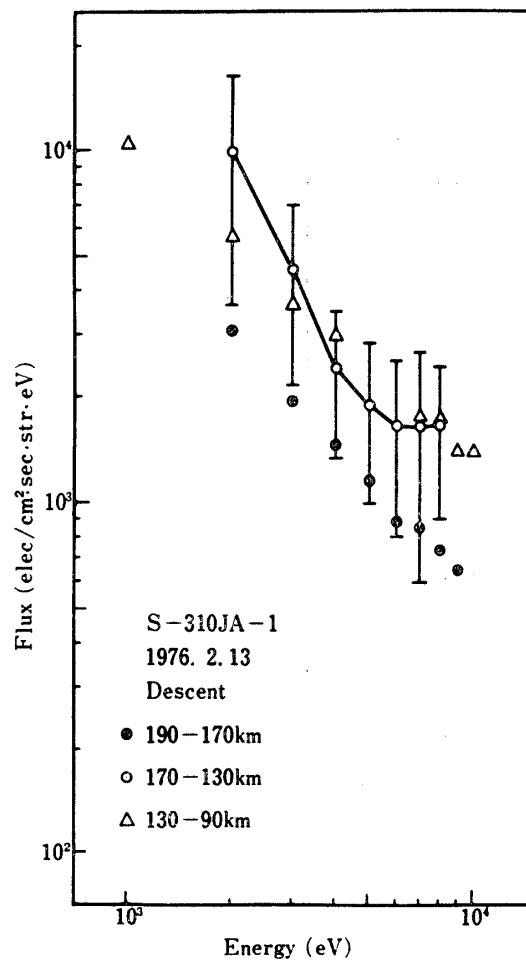


図4 ロケット下降時に測定された電子のエネルギースペクトル

Fig. 4. Energy spectra of electrons measured when the rocket was descending.

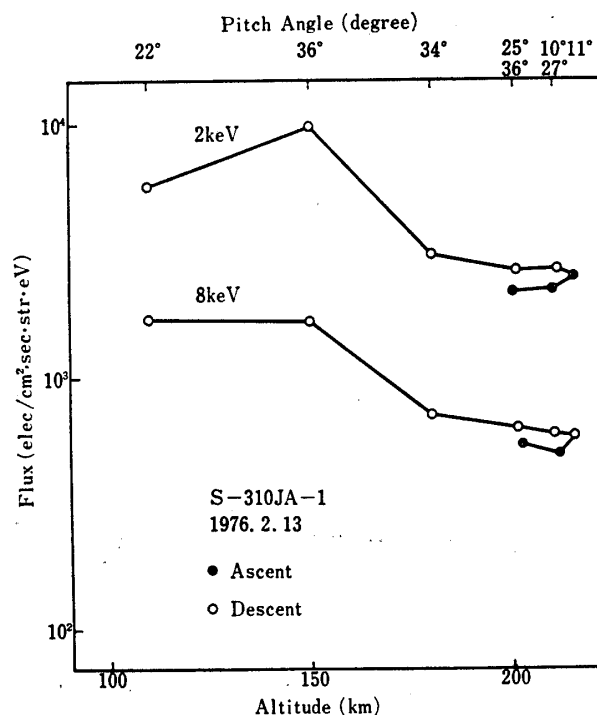


図 5 電子フラックスの高度変化
Fig. 5. Altitude dependencies of electron fluxes.

3.2. S-310JA-2 号機

図 6 に種々の高度、種々のピッチ角での電子のエネルギースペクトルを示す。ここでは precipitation および upward flux が、北半球の場合と同じピッチ角で表されるように 180° の補角をピッチ角と呼んでいる。480 eV, 740 eV の電子の磁力線に沿った強いフラックスが、ロケットの最高到達高度近傍 (213 km) で観測された。CHOY *et al.* (1971) が報告している数 keV 電子の磁力線に沿ったフラックスは、ここでは観測されなかった。観測された電子フラックスは 1140 eV で、 $7.3\text{--}8.3 \times 10^3$ electrons/cm²·sec·str·eV, 4.2 keV で $1.55\text{--}1.90 \times 10^3$ electrons/cm²·sec·str·eV であった。

図 7 に電子フラックスの高度変化を示す。480 eV, 740 eV ではロケットの最高到達高度付近でフラックスが増大しているが、ほかのエネルギーではそれほど顕著なフラックスの変化は見られない。

高度変化はあまりなかったもので、高度 160 km 以上でのフラックスの変動がピッチ角によるものと仮定して書いたものが図 8 である。最小のピッチ角 5° となるのは、最高到達高度 213 km 近傍であった。480 eV, 740 eV のフラックスは、ピッチ角が小さくなると少しずつ

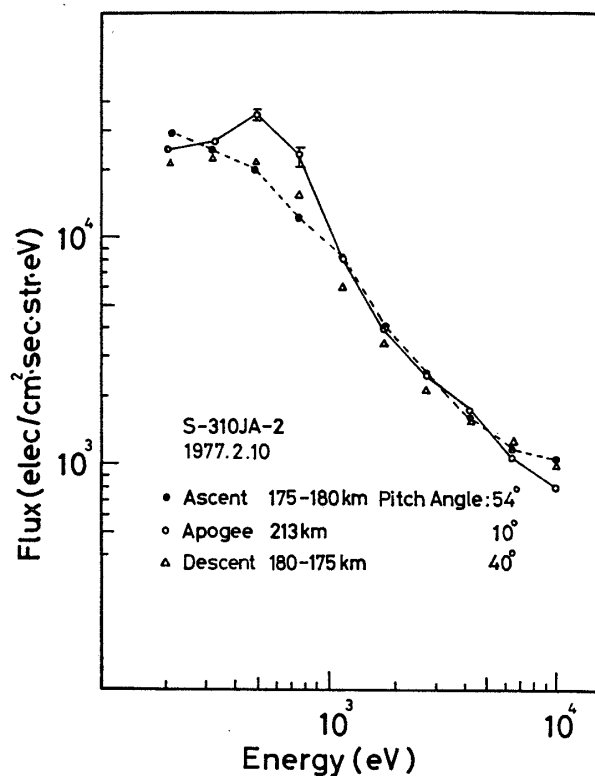


図 6 種々の高度およびピッチ角での電子のエネルギースペクトル

Fig. 6. Electron energy spectra at various altitudes and various pitch angles.

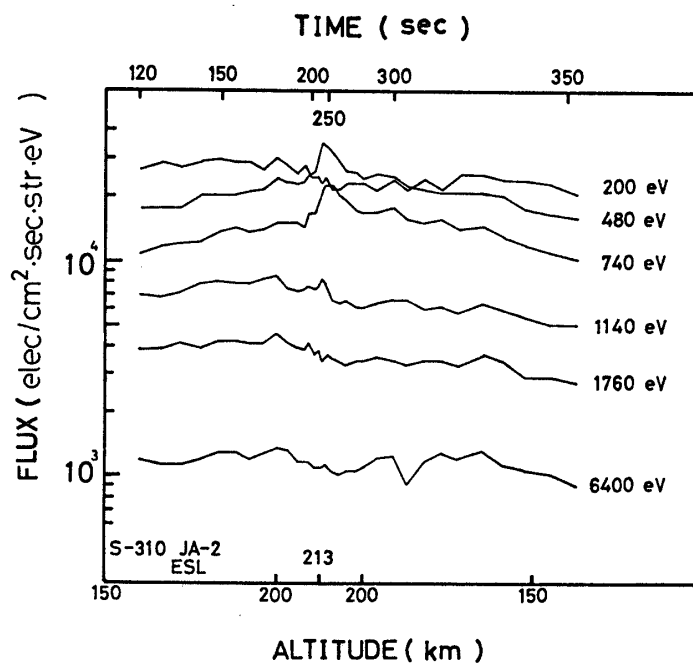


図 7 電子フラックスの高度変化

Fig. 7. Altitude dependencies of electron fluxes.

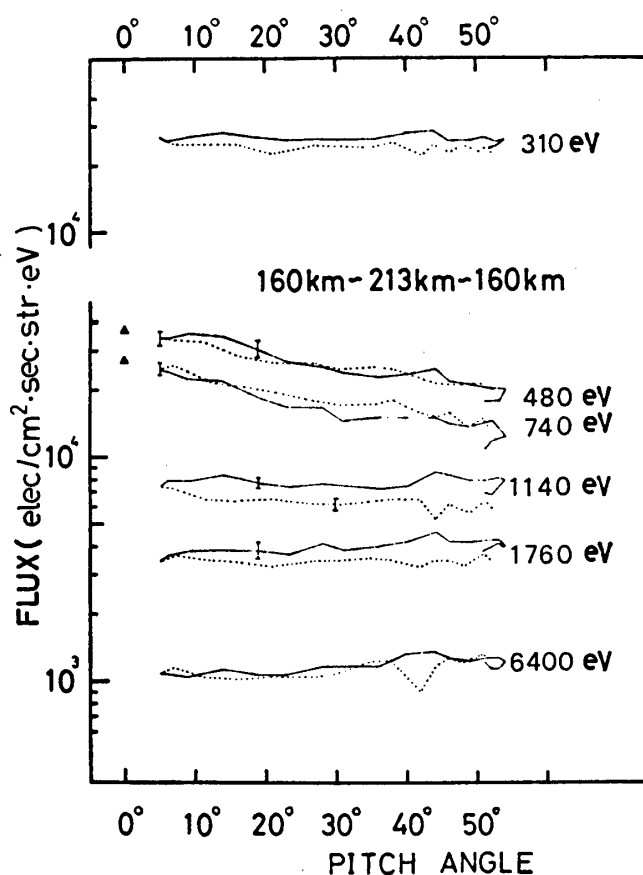


図 8 電子フラックスのピッチ角依存性

Fig. 8. Pitch angle dependencies of electron fluxes.

増大していくが、ほかのエネルギーのフラックスはたいした変化を示していない。したがって、観測されたフラックスは、ピッチ角に依存する部分（磁力線に沿った成分）と依存しない部分（等方成分）とに分けられる。等方成分をエネルギー E のべき分布、磁力線方向の成分をガウス分布を用いて近似すると、式 (1) となる。

$$\frac{dF}{dE} = AE^{-\alpha} + B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}, \quad (1)$$

ここで, $A=2.4 \times 10^6$ $\alpha=0.87$

$B=2.8 \times 10^4$ $E_0=550$ eV

$\sigma=170$ eV (ピッチ角 5° , 213 km).

ピッチ角 0° に外そうしたエネルギー・スペクトルは、式 (2) で表される。ここで 480 eV, 740 eV のフラックスは図 8 の三角印の値を用い、ほかのエネルギーのフラックスは、ピッチ角 5° の値をそのまま用いてある。

$$\frac{dF}{dE} = AE^{-\alpha} + B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}, \quad (2)$$

ここで, $A=1.6 \times 10^6$ $\alpha=0.83$

$B=3.0 \times 10^4$ $E_0=565$ eV

$\sigma=195$ eV (ピッチ角 0° , 213 km).

普通オーロラ中では E_0 は数 keV であるが, diffuse aurora 中と思われるので $E_0=565$ eV という値ももっともである.

次に, 式 (2) の中のガウス分布の項から降下電子の速度分布を求めると図9のごとくなる. すなわち, 1.4×10^7 m/sec 程度の速度を持つ電子流が磁力線に沿って流れていることを示している.

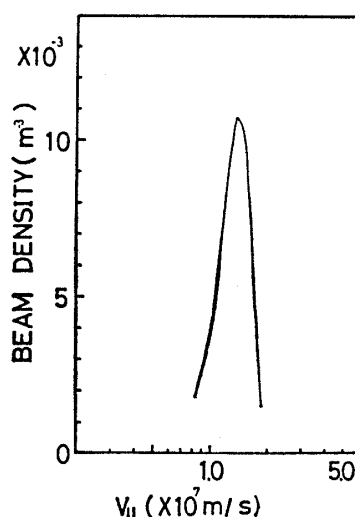


図9 磁力線に沿う降下電子の速度分布

Fig. 9. Velocity distribution of field-aligned precipitating electrons.

次に, 降下電子の分布関数を用いて, どの程度の電流が運ばれているかを計算する.

$$\frac{dF}{dE} = B \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] \text{ electrons/cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{str} \cdot \text{eV}$$

であるから, 電流密度 J は,

$$J = q \int \frac{dF}{dE} dE \cdot 2\pi = qB \int \exp \left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2} \right] 2\pi dE$$

となる (ここに $q=1.6 \times 10^{-19}$ C).

ここで電流密度への寄与は $E=E_0$ 付近が大きいので、積分範囲を $-\infty$ から $+\infty$ までとると、

$$J=2\pi qB \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2}\right] dE=(2\pi)^{3/2}qB\sigma=1.47\times 10^{-7} \text{ A/m}^2 \text{ となる.}$$

4. 結 言

静穏時とサブストーム中に電子のエネルギースペクトルを観測したが、極域電離層およびオーロラを解明するためにさらに多くのデータを蓄積、解析することが必要である。

謝 辞

これ等のロケット実験は、第17次および第18次南極地域観測隊によってなされたものである。著者は南極でこれ等の実験を行う機会を与えて下さった国立極地研究所および、これ等の実験を実際に組み立て、打ち上げ、データを取得してきて下さった観測隊員に感謝の意を表する。

文 献

- CHOY, L. W., ARNOLDY, R. L., POTTER, W., KINTNER, P. and CAHILL, L. J., Jr. (1971): Field-aligned particle currents near an auroral arc. *J. Geophys. Res.*, **76**, 8279-8298.
- HILL, R. W., GRADER, R. J., SEWARD, F. D. and STOERING, J. P. (1970): Soft particle flux above 130 km at midlatitude. *J. Geophys. Res.*, **75**, 7267-7271.
- KUBO, H., MUKAI, T., ITOH, T. and HIRAO, K. (1976): Rocket observation of low-energy electrons in the mid-latitude night-time ionosphere. *Space Res.*, **16**, 497-501.
- KUBO, H., ITOH, T., MURATA, S., KOKUBUN, S. and HIRASAWA, T. (1978): Precipitating electrons observed on board the Japanese Antarctic sounding rockets S-310JA-1 and S-310JA-2. *Mem. Natl Inst. Polar Res., Spec. Issue*, **9**, 24-33.
- 久保治也・村田節夫・伊藤富造・国分 征 (1979): S-310JA-2 号機による降下電子の観測。南極資料, **63**, 17-28.

(1979年3月17日受理)